ВИАМ/2007-204892

Импульсная дуговая сварка алюминиевого сплава В-1341

М.А. Гуреева

О.Е. Грушко

В.В. Овчинников

Г.Г. Клочков

Август 2007

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем 30 научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в 4 филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Статья подготовлена для опубликования в журнале *«Технология металлов»*, № 2, 2008 г.

Электронная версия доступна по адресу: www.viam.ru/public

Импульсная дуговая сварка алюминиевого сплава В-1341

М.А. Гуреева, О.Е. Грушко, В.В. Овчинников,
Г.Г. Клочков

ГОУ «Московский государственный индустриальный университет» (МГИУ), г. Москва
ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» (ВИАМ), г. Москва

Для дуговой сварки деформируемых алюминиевых сплавов неплавящимся электродом довольно широкое применение находят процессы, вызывающие интенсивные гидродинамические колебания расплавленного металла в сварочной ванне. При этом наблюдается эффективное перемешивание основного металла с присадочным металлом и дробление оксидных включений в донной части ванны, активизируются процессы газовыделения, изменяются условия кристаллизации металла, приводящие к формированию мелкокристаллической структуры металла швов. Колебания расплавленного металла при сварке могут происходить в результате прерывистой подачи присадочной проволоки, механических колебаний электрода, наложения на основной сварочный ток кратковременных импульсов, применения модулированного тока и воздействия дополнительных магнитных полей или вращения электрода [1–9].

При механическом колебании неплавящегося электрода движение расплава в сварочной ванне происходит в результате изменения нормальной составляющей давления дуги, обратно пропорциональной углу отклонения электрода от вертикали [1–6]. Прерывистая подача присадочной проволоки приводит к «встряхиванию» сварочной ванны вследствие изменения объема поступающего в нее металла [6, 10].

В случае наложения кратковременных импульсов тока колебания в сварочной ванне возникают вследствие резкого увеличения давления дуги во время их прохождения, а при использовании модулированного или асимметричного тока – благодаря разности силового воздействия дуги на

металл в моменты импульса и паузы или при прямой и обратной полярности [10]. Отклонения дуги от ее вертикального положения, а следовательно, и колебания металла сварочной ванны создаются также в результате взаимодействия объемной электромагнитной силы с внешним магнитным полем [8]. Переменное магнитное поле вызывает периодическое отклонение столба дуги, амплитуда и скорость которых зависят от напряженности магнитного поля и частоты смены его полюсов. Возможно воздействие на сварочную дугу электромагнитного поля, возникающего в результате пропускания переменного тока через участок присадочной проволоки [9]. При этом колебания металла сварочной ванны возникают вследствие изменения силового воздействия дуги в результате постоянного изменения ее положения относительно электрода, что обусловлено действием переменных электромагнитных полей, создаваемых сварочной дугой и токопроводящим участком присадочной проволоки.

На основе результатов работ [1–10] можно заключить, что перспективным при сварке алюминиевых сплавов является наложение мощных импульсов тока. Последний процесс наиболее рационален при автоматической сварке протяженных швов.

Целью данной работы являлось изучение влияния импульсной сварки неплавящимся электродом на параметры проплавления, геометрию сварного шва, структуру, плотность и механические свойства сварных соединений деформируемых алюминиевых сплавов системы Al–Mg–Si. Сварку проводили на образцах алюминиевых сплавов системы Al–Mg–Si (В-1341 с различным содержанием кальция) толщиной 3 мм. Для питания дуги переменным током применяли источники марки ИСВУ-315 и ИСВУ-400. Использовали автоматическую однопроходную сварку с присадочной проволокой Св. АК5 и Св. АМг63 и без проволоки.

Сварка с наложением импульсов тока производится от двух параллельно подключенных источников: переменного тока и импульсов. Сварка выполняется рабочей дугой, на которую в периоды прямой полярности от

самостоятельного источника ИМИ-2 накладываются регулируемые по длительности и частоте как единичные импульсы, так и импульсы тока; в различных сериях амплитуда должна совпадать с амплитудой синусоидального тока рабочей дуги. В случае наложения импульсов при горении дуги обратной полярности электрод вследствие высокой динамической нагрузки разрушается, а частицы его попадают в металл шва.

Рентгеновское просвечивание сварных соединений проводили на аппаратах РУП 120-5 на пленке РТ-5. Химический состав исследуемых сплавов и их механические свойства представлены в табл. 1 и 2. Перед сваркой образцы подвергали травлению в щелочи и осветлением в 30%-ном растворе азотной кислоты.

Таблица 1.

Химический состав исследуемых вариаций сплава В-1341

Сплав	Содержание компонентов, %									
	Si	Mg	Mn	Cu	Fe	Cr	Ti	Ca	Al	Mg_2Si
1	0,83	0,6	0,27	0,44	0,39	0,05	0,05	–	Ост.	0,95
2	0,65	0,40	0,18	0,14	0,18	0,05	0,05	0,12	-«-	0,93
3	0,71	0,43	0,17	0,12	0,18	0,04	0,05	0,30	-«-	0,95

Таблица 2.

Механические свойства сплава В-1341
в искусственно состаренном состоянии

Сплав	Предел прочности $\sigma_в$, МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ, %
1	325–336 332	288–295 290	15,0–21,0 17,7
2	334–342 338	294–300 297	15,0–18,9 16,9
3	345–357 350	300–308 303	15,0–18,5 16,7

В исследованиях использовали стыковые соединения. В этом случае процентное отношение длины дефектных участков к общей длине сварных швов в зависимости от режима импульсной сварки рассчитывали по рентгеновским снимкам. Для определения влияния режима импульсной сварки на коэффициент трещинообразования применяли образцы для пробы «рыбий скелет», а также определяли критическую скорость деформации.

При импульсной сварке основными параметрами процесса были ток непрерывной дуги $I_н$, ток в импульсе $I_и$, длительность импульса $t_и$ и число импульсов в пачке n. Важное технологическое значение имеет парное взаимодействие параметров: жесткость режима $G=t_п/t_и$ и коэффициент модулирования сварочного тока $K=I_и/I_п$.

Первоначально проведенные эксперименты показали: с повышением тока в импульсе однозначно увеличиваются все геометрические параметры шва (ширина и глубина проплавления); с повышением длительности импульса тока увеличиваются ширина шва и глубина проплавления; с увеличением длительности паузы уменьшаются глубина проплавления и ширина шва; повышение коэффициента модуляции сварочного тока приводит к увеличению ширины шва, а глубина проплавления увеличивается незначительно; повышение тока дежурной дуги (тока в паузе) оказывает небольшое влияние на ширину шва, но изменяет существенно глубину проплавления и внешний вид шва.

Показатели дефектности сварных соединений в зависимости от типа сварного соединения и способа сварки приведены в табл. 3. Из анализа этих данных видно, что при использовании импульсной сварки удается существенно снизить дефектность в сварных швах.

Наиболее распространенными дефектами сварных швов из алюминиевых сплавов являются оксидные пленки, которые, как правило, располагаются по оси шва в корневой его части, и высокая пористость. Особенно сильно эти дефекты проявляются в нахлестанных и торцовых соединениях, которые обусловлены конструктивными особенностями изделий. При аргонодуговой сварке неплавящимся электродом в таких соединениях тугоплавкая гигроскопичная оксидная пленка разрушается недостаточно интенсивно. Так, при автоматической аргонодуговой сварке переменным током она составляет 60–80% высоты шва. Как показывает производственный опыт, наличие такой пленки в шве приводит к несплошностям металла шва и, следовательно, к несплошностям соединений, которые выявляются при испытании узлов и в

процессе их эксплуатации.

Таблица 3.

Показатели дефектности стыковых соединений сплавов В-1341 в зависимости от способа сварки

Сплав	Отношение длины дефектных участков к общей длине швов, %		
	непрерывная	импульсная	Примечание
1	80	0–15	Без присадки
	60	0–10	С присадкой
	70	0	На проплав без присадки
	15	0	Химическое травление
	70	0	С искусственной оксидной пленкой
2	85	0	Без присадки
	65	0–5	С присадкой
	60	0–5	На проплав без присадки
	20	0	Химическое травление
	75	0–5	С искусственной оксидной пленкой
3	65	0	Без присадки
	50	0	С присадкой
	50	0	На проплав без присадки
	10	0	Химическое травление
	55	0	С искусственной оксидной пленкой

При сварке различного рода конструкций с вакуумно-плотными соединениями предъявляют повышенные требования к структуре металла шва. Плотность шва тем выше, чем мельче и разориентированнее структура литого металла. Таким образом, для решения проблемы получения плотных сварных соединений, особенно при изготовлении тонкостенных конструкций из алюминиевых сплавов, необходимо повысить интенсивность разрушения оксидной пленки и одновременно создать условия формирования дезориентированной структуры.

Интенсивность разрушения оксидных пленок можно повысить путем изменения характера ввода тепловой энергии и увеличения ее плотности. Для решения этой задачи перспективным является наложение на дугу мощных кратковременных импульсов тока, которые позволяют увеличить интенсивность разрушения оксидной пленки и получить дезориентированную структуру металла шва [2–4].

Процесс сварки с наложением на дугу кратковременных импульсов тока характеризуется большим числом параметров режима, поэтому для получения наилучшего эффекта необходима оптимизация режима с учетом получения дезориентированной структуры металла шва. Основываясь на серийной технологии, опробовали различные способы подготовки поверхности под сварку, травление в растворе щелочи и осветление в азотной кислоте с последующим шабрением перед сваркой и только травление с осветлением без шабрения с выдержкой перед сваркой от 1 до 7 сут. Для установления влияния отдельных параметров режима сварки на качество швов с испытательными целями часть образцов нагревали в печи в атмосфере воздуха при 350–400°С в течение 1 ч и охлаждали не вынимая из печи, отключив ее. После такой подготовки поверхности при сварке без наложения импульсов обнаруживается большое количество дефектов, при сварке с наложением импульсов наличие дефектов зависит от значений отдельных параметров процесса.

Поскольку при наложении на дугу мощных кратковременных импульсов тока в сварочной ванне возникают высокие градиенты температур и сложный турбулентный характер движения жидкого металла, то определить расчетным путем оптимальные параметры режима сварки, зависящие от теплофизических свойств жидкого металла ванны и места приложения периодически действующей силы, невозможно. Они могут быть определены только экспериментально.

Влияние параметров режима наложения импульсов тока на плотность металла шва (наличие оксидных включений и пор) изучали с использованием многофакторного планирования экспериментов. Для этого реализован полный трехфакторный план. В качестве переменных факторов выбраны основные регулируемые параметры наложения импульсов: амплитудное значение тока, длительность паузы и число импульсов в «пачке». Длительность импульса и скорость автоматической сварки оставались неизменными. В качестве искомой величины (отклика) принято отношение суммарной длины дефектных участков к общей длине шва. Длину дефектных

участков определяли по рентгенограммам. Статистическая обработка данных реализованных экспериментов в соответствии с полным трехфакторным планом позволила получить следующие адекватные уравнения регрессии:

$$y = 0{,}250 + 0{,}036x_1 + 0{,}057x_2 + 0{,}035x_3 + 0{,}083x_1x_3,$$

где x_1 – ток в импульсе; x_2 – длительность паузы; x_3 – число импульсов в серии.

Полученные уравнения регрессии позволили установить степень влияния каждого фактора на плотность металла шва. В наибольшей степени влияет амплитудное значение тока, в меньшей степени – число импульсов в серии и совсем незначительно – длительность паузы, поэтому область оптимальных режимов по току и числу импульсов в серии находится в пределах между максимальным и нулевым уровнями, а по длительности паузы – между минимальным и нулевым уровнями (0,02–0,06 с). Интервал варьирования по току импульса выбирали в пределах 100 А.

На установленных оптимальных режимах наложения импульсов тока сваривали образцы с различной формой стыка. Анализ результатов обработки рентгенограмм сварных швов (табл. 4) показал, что при подготовке поверхности травлением и шабрением наложение импульсов тока приводит к уменьшению числа дефектов, соответственно, от 15–20 до 1,6–3,7. Причем наибольшее уменьшение числа дефектов имеет место для нахлесточного соединения.

Таблица 4.

Влияние способа сварки на число дефектов в сварных швах сплава В-1341 с различным содержанием кальция (форма соединения – стыковое)

Способ сварки	Число дефектов (оксидные пленки, поры) на 100 мм длины шва для сплавов:		
	1	2	3
С наложением импульсов	2,17 (0,2)	1,3 (0,9)	0,5 (0,7)
Без импульсов	40,4 (0,58)	21,7 (0,33)	16,9 (0,35)

Примечание. Приведены средние данные по результатам обработки рентгенограмм швов длиной ≥3 м. Без скобок приведены результаты сварки образцов после подготовки поверхности травлением с вылеживанием до сварки в течение 7 сут. В скобках приведены результаты сварки образцов после подготовки поверхности шабрением с вылеживанием до сварки в течение 3 ч.

Значительное уменьшение числа дефектов в швах связано только с изменением гидродинамического состояния жидкого металла в ванне в результате наложения импульсов тока. Активное перемешивание металла вызывает интенсивное механическое разрушение и дробление оксидных пленок, облегчает всплытие фрагментов и удаление пор.

Для оценки направленности потоков жидкого металла в ванне, при различных режимах сварки, на кромки с оксидной пленкой наносили карбид вольфрама в виде полосок шириной 3–4 мм с расстоянием между полосками 25–30 мм. Распределение частиц карбида вольфрама определяли по внешнему виду швов и рентгенограммам.

Результаты экспериментов показали, что при сварке образцов дугой переменного тока без наложения модулированных импульсов тока протяженность включений оксидной пленки составляет 1,42–1,67 мм. При наложении на дугу модулированных импульсов тока с амплитудой до 100–280 А при длительности импульса 0,02–0,05 с как дисперсность, так и суммарная протяженность включений оксидной пленки в шве мало отличается от их величины, характерной для аргонодуговой сварки без наложения импульсов. С увеличением амплитудного значения тока в импульсе до 450–460 А возрастает дисперсность оксидных включений в металле шва при общем сокращении их суммарной протяженности.

Анализ внешнего вида сварных швов и их рентгенограмм показал, что при величине амплитудного значения тока в амплитуде до 280 А частицы карбида вольфрама (вместе с фрагментами оксидной пленки) располагаются вдоль линии стыка торцевых поверхностей свариваемых кромок (рис. 1, *а*). Увеличение амплитудного значения тока в импульсе до 300–460 А способствует возникновению направленного движения жидкого металла сварочной ванны (рис. 1, *б*). Рост амплитудного значения тока в импульсе до 500–750 А сопровождается увеличением глубины кратера в ванне (рис. 1, *в*).

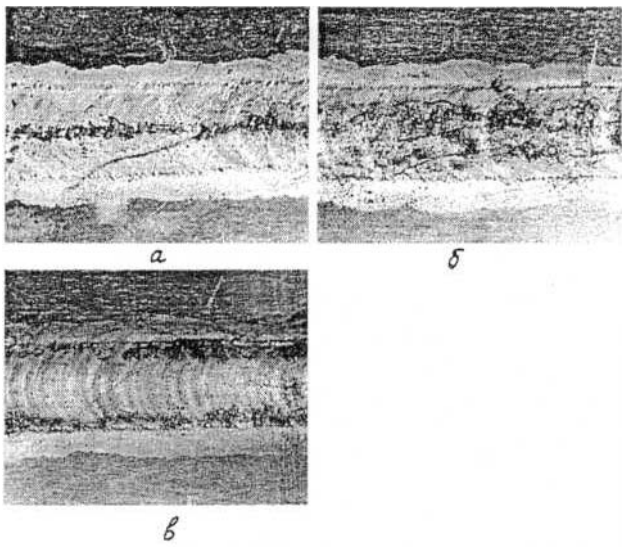

Рисунок 1. Внешний вид лицевой поверхности соединений сплава В-1341 с частицами карбида вольфрама, выполненных автоматической аргонодуговой сваркой с наложением модулированных импульсов тока: *а* – ток импульса 100–280 А; *б* – ток импульса 300–460 А; *в* – ток импульса 500–750 А

Схему механизма фрагментации оксидной пленки в стыке при сварке алюминиевых сплавов можно сформулировать следующим образом: для более мелкой фрагментации оксидной пленки в ванне необходимо формирование углубления в виде кратера в жидком металле под действием источника нагрева. Образование кратера создает условия для непосредственного воздействия ионной бомбардировки на оксидную пленку, расположенную на торцевой поверхности свариваемых кромок. При образовании кратера в жидком металле сварочной ванны формируются устойчивые и направленные потоки расплавленного металла, обеспечивающие вынос на поверхность шва фрагментов оксидной пленки по боковым стенкам кратера.

На рис. 2 представлены фотографии макрошлифов кратера в сварочной ванне при различном значении тока модулированных импульсов.

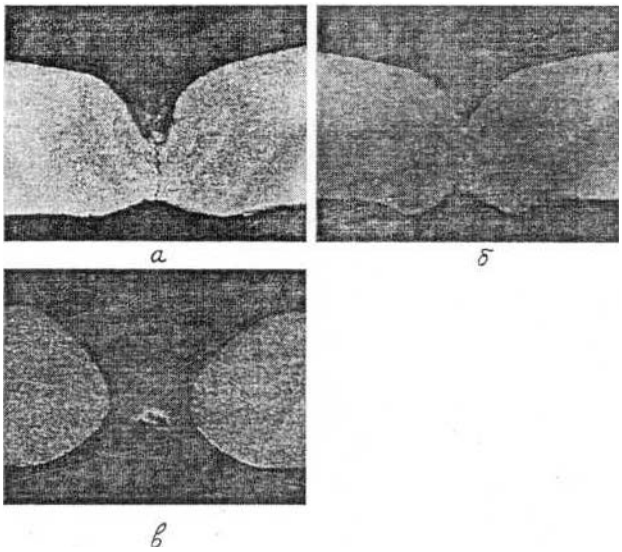

Рисунок 2. Макроструктура сварочной ванны (кратера) при сварке с модулированными импульсами со значением тока импульса: *а* – 100–280 А; *б* – 300–460 А; *в* – 500–750 А

Образование кратера в сварочной ванне связано с изменением формы столба и диаметра активного пятна дуги при наложении импульсов. Форма столба дуги определяется характером пламенных потоков в нем и зависит от физических характеристик газа дуги, конструктивных особенностей неплавящихся электродов, характера тока и его полярности.

Для изучения формы столба дуги при наложении модулированных импульсов применялась методика поперечного зондирования двойным горизонтальным зондом [11]. Два зонда, выполненные из вольфрамовой проволоки (ВНР) диаметром 0,3 мм, располагаются в горизонтальной плоскости на расстоянии друг от друга и жестко закрепляются в электрододержателе, конструкция которого обеспечивает пространственное позиционирование блока зондов в дуге и вращение его вокруг вертикальной оси. Расстояние между электродами при позиционировании блока в дуговом промежутке определяли с помощью бинокулярного микроскопа МБС-9, оснащенного окулярами с измерительной сеткой. Длину дуги устанавливали по индикатору с ценой деления шкалы 0,1 мм. Измерение потенциала обоих зондов относительно неплавящегося электрода при прохождении ими через дугу фиксировалось с помощью двухлучевого цифрового запоминающего осциллографа С9–8.

Эксперименты выявили, что существенное влияние на форму дуги и

диаметр ее столба оказывает наложение на дугу модулированных импульсов тока. Увеличение амплитудного значения тока в импульсе сопровождается уменьшением диаметра столба дуг (рис. 3). При этом проявляется определенная зависимость между током дуги и амплитудным значением тока в импульсе, определяющая степень сжатия столба дуги (см. рис. 3).

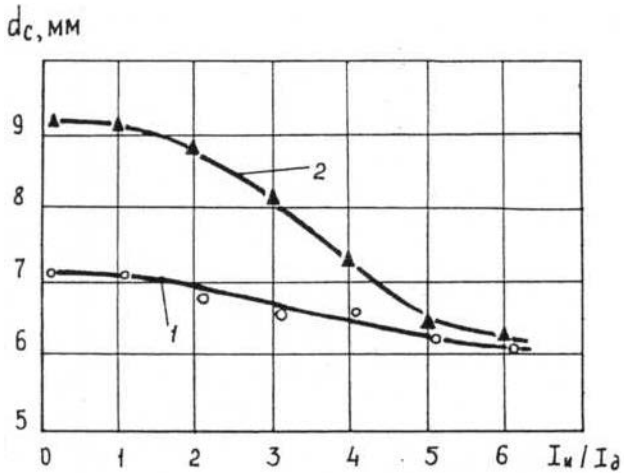

Рисунок 3. Зависимость диаметра столба дуги от соотношения тока в импульсе и тока дуги на расстоянии 1,0 (*1*) и 2,0 (*2*) мм от электрода при горении дуги в аргоне ($I_д$=75 А; $L_д$=3 мм, $t_и$=0,08 с)

Перспектива роста глубины проплавления и формирование кратера при наложении на дугу модулированных импульсов тока неразрывно связаны с механическим воздействием дуги на металл сварочной ванны. Давление дуги на металл сварочной ванны зависит от характера импульсов тока (динамическое давление). Давление сварочной дуги является одной из важнейших технологических характеристик, определяющей ее проплавляющую способность, движение расплавленного металла и формирование сварного шва.

Для обоснования выбора параметров режима импульсной сварки существенным является определение зависимости газодинамического давления дуги переменного тока от параметров импульса. Известные «весовые» способы и аппаратура позволяют устанавливать связь между общей силой, воздействующей на активное пятно открытой дуги, и эффективным значением тока при разряде и не могут быть пригодны для замера газодинамического давления импульсной дуги.

Для определения газодинамического давления импульсной дуги использовалась схема, представленная в работе [12], состоящая (рис. 4) из плоского медного охлаждаемого электрода с осевым отверстием диаметром 2 мм, соединенным с малогабаритным индуктивным датчиком для измерения ударных и стационарных газовых потоков. Механическое перемещение мембраны датчика от воздействия газовых потоков преобразуется в электрический сигнал, который затем усиливался и регистрировался осциллографом.

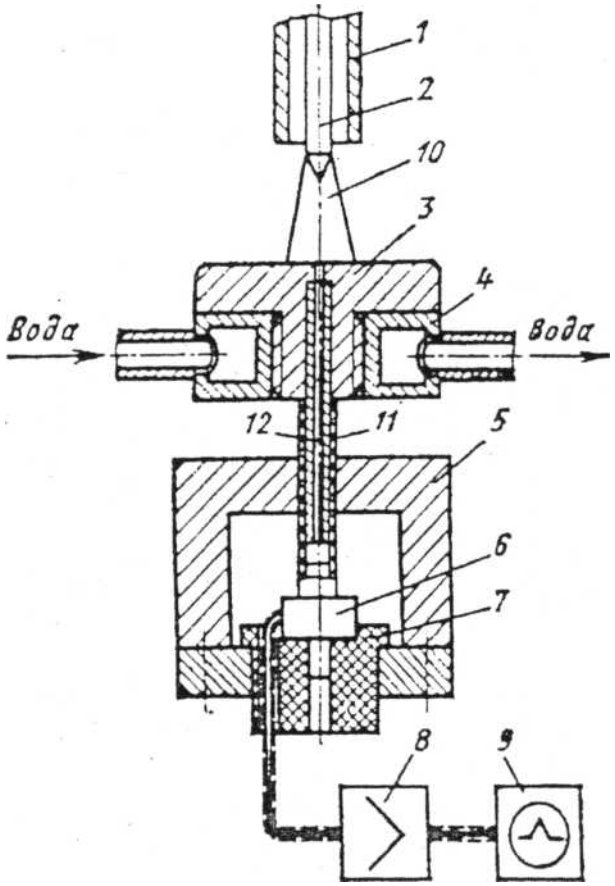

Рисунок 4. Схема измерения газодинамического давления дугового разряда [13]: *1* – сопло сварочной горелки; *2* – вольфрамовый электрод; *3* – медный электрод; *4* – охладитель; *5* – стальной экран; *6* – индуктивный датчик; *7* – изолятор; *8* – усилитель; *9* – осциллограф; *10* – дуговой разряд; *11* – изоляционная трубка; *12* – медная трубка

Измерение газодинамического давления осуществляли при импульсном дуговом разряде переменного тока при расстоянии 3 мм между вольфрамовым электродом диаметром 3 мм и медным электродом. Эксперименты показали, что величина и скорость изменения

газодинамического давления разряда наиболее существенно зависят от скорости нарастания импульса тока (рис. 5). Установлено, что при импульсном разряде со скоростью нарастания импульса $S_и$≈3 кА/с, несмотря на меньшие значения максимального тока, давление значительно превосходит величину давления импульса со скоростью нарастания $S_и$≈0,6 кА/с. При крутом фронте нарастания тока импульса в диапазоне 40–200 А наблюдается резкое повышение давления и затем спад при установившемся значении тока. Импульсы тока со скоростью нарастания 0,6 кА/с также вызывают повышение давления при нарастании тока, однако это проявляется в небольших пределах.

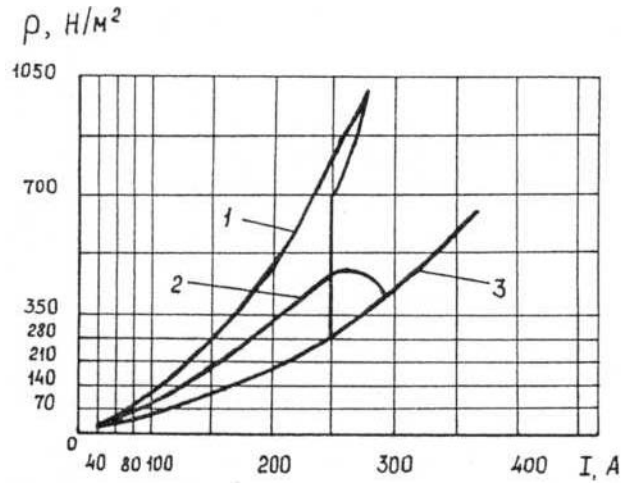

Рисунок 5. Циклы амплитудных значений давления в центре столба дуги в зависимости от величины тока в импульсе и скорости его нарастания $S_и$: *1* – $S_и$≈3 кА/с; *2* – $S_и$≈0,6 кА/с; *3* – стационарный установившийся разряд

Анализ процессов, протекающих при импульсном разряде, показал, что вследствие большого начального давления в столбе открытой дуги наблюдается расширение плазменного жгута с одновременным ускорением потоков плазмы вдоль электродов под действием магнитного давления. В связи с этим наиболее вероятными причинами значительного роста газодинамического давления в начальный период развития импульсно-дугового разряда при атмосферном давлении по сравнению со стационарным разрядом являются ускорение плазменных потоков, а также отставание скорости роста площади активного пятна дуги от скорости нарастания тока импульса. Это приводит к эпизодическому повышению плотности тока в активном пятне дуги. Результаты

экспериментов показали, что газодинамическое давление дуги в импульсном режиме в начальный период развития разряда значительно выше значения газодинамического давления в стационарном режиме горения дуги.

Получение сварных соединений практически без дефектов или с дефектами, не превышающими норм стандартных производственных инструкций для поверхностей, обработанных только травлением с выдержкой до 7 сут перед сваркой, позволяет в ряде случаев полностью отказаться от операции шабрения. В серийном производстве трудоемкость операции шабрения высока, поэтому сварка с наложением на дугу кратковременных импульсов тока не только повышает качество соединений, но и снижает трудоемкость их изготовления.

Наложение на дугу импульсов тока изменяет показатели горячеломкости (рис. 6). Так, критическая скорость деформации возрастает на 25–50% по сравнению со сваркой без импульсов. Это связано с тем, что периодическое изменение температурных условий в ванне существенно влияет на процесс кристаллизации и характер образующейся структуры шва и, как следствие, на его технологическую прочность в температурном интервале кристаллизации. Повышение стойкости против образования горячих трещин связано не только с образованием дезориентированной и более мелкозернистой структуры, но и с эффектом залечивания зарождающихся трещин под действием периодических гидродинамических колебаний металла в ванне.

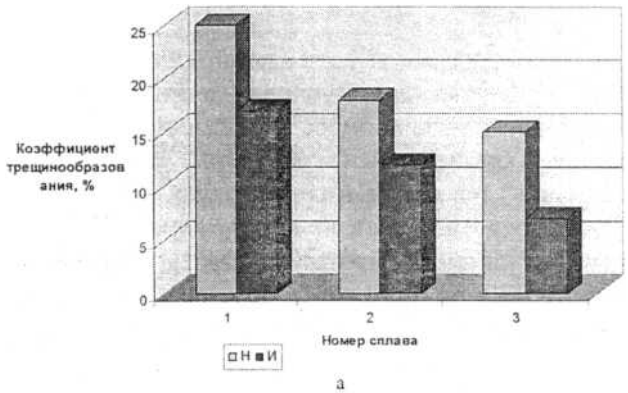

Рисунок 6. Влияние способа сварки на склонность сплавов системы Al–Mg–Si к трещинообразованию при сварке по пробе «рыбий скелет» (*а*) и пробе на критическую скорость деформации (*б*):
Н – непрерывная сварка; И – импульсная сварка

Увеличение исходного содержания кальция в сплаве способствует снижению его склонности к трещинообразованию при сварке.

Прочностные свойства соединений, выполненных с наложением на дугу кратковременных импульсов тока, выше, чем при сварке без них. Так, для сплава В-1341 предел прочности повышается на 7–15%, а угол изгиба на 15–35%. Указанное повышение уровня механических свойств прослеживается для всех исследованных вариаций сплава В-1341 (табл. 5).

Таблица 5.

Механические свойства сварных соединений из В-1341 различного состава в зависимости от способа сварки

Сплав	Способ сварки	Предел прочности, МПа	Угол загиба, град	Ударная вязкость, кДж/м^2	
				по шву	по линии сплавления
1	I	312	109	19,5	12,5
	II	325	115	21,7	17,5
2	I	372	82	16,5	7,6
	II	378	89	19,5	10,5
3	I	345	80	22,0	9,0
	II	348	80	25,0	9,8

Примечание. Марка присадочной проволоки Св. АМг63. Способы сварки: I – непрерывная; II – импульсная. Приведены средние данные по результатам испытаний образцов.

Металлографические исследования показали, что наложение импульсов тока приводит к уменьшению дендритной ячейки от 0,029–0,040 до 0,012–0,019 мм, т. е. в 1,5–3 раза.

Поверхности разрушенных образцов после испытаний на малоцикловую усталость исследовали на электронном микроскопе (табл. 6). Рост трещины за цикл оценивали по расстоянию между усталостными бороздками – знаками, которые оставляют трещины в каждом цикле нагружения. Для одной и той же глубины трещины расстояние между усталостными бороздками больше, т.е. скорость ее роста выше для образцов, сваренных без наложения импульсов тока. При глубине трещины 1,4 мм механизм ее развития на образцах, сваренных без наложения импульсов, характерен для спонтанного разрушения (рис. 7, *а*), а с наложением – трещина растет медленнее при достаточном уровне сопротивления материала ее развитию

(рис. 7, *б*). Таким образом, способность материала сопротивляться дальнейшему росту трещины возрастает при сварке с наложением импульсов. Увеличение долговечности при одном и том же уровне нагружения на образцах, сваренных с наложением импульсов тока, только за счет стадии роста трещины более чем в 2 раза маловероятно, поэтому, очевидно, имеет место и увеличение стадии зарождения трещины.

Таблица 6.

Малоцикловая усталость сварных соединений сплава В-1341 в зависимости от способа сварки

Сплав	Способ сварки	Число циклов до разрушения ($\times 10^3$) при нагрузке, МПа				
		280	250	230	200	180
1	I	0,72	2,15	4,0	12,3	21,2
	II	1,0	4,25	10,2	26,02	44,5
2	I	0,76	2,05	4,17	11,5	19,5
	II	1,26	3,70	10,3	37,4	68,6
3	I	0,63	–	4,4	–	–
	II	0,88	–	12,8	–	–

Примечание. Способы сварки: I – непрерывная; II – импульсная. Приведены средние данные по результатам испытаний пяти образцов.

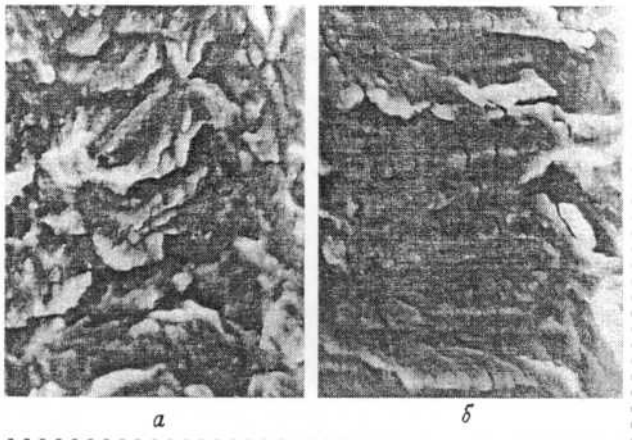

Рисунок 7. Фрактограммы зоны разрушения образцов сплава В-1341 при испытаниях на малоцикловую усталость, полученных сваркой без (*а*) и с (*б*) наложением модулированных импульсов тока, ×1500

Таким образом, установлено влияние отдельных параметров процесса сварки с наложением на дугу кратковременных импульсов тока на качество швов. Показано, что число дефектов (оксидных пленок и пор) в швах уменьшается в результате наложения импульсов тока от 2 до 5 раз (при шабрении поверхности стыка) и от 15 до 32 раз (при травлении). Переменные

градиенты температур и сложный турбулентный характер движения жидкого металла сварочной ванны у межфазной границы при наложении импульсов тока вызывают дискретный рост дендритов из новых центров с постоянным изменением направления их осей, что приводит к образованию дезориентированной мелкозернистой структуры шва. Наложение на дугу импульсов тока повышает показатели горячеломкости (повышение критической скорости деформации), увеличения технологической прочности металла шва в температурном интервале кристаллизации и залечивания зарождающихся трещин под действием периодических гидродинамических колебаний жидкого металла ванны. Установлено, что повышение содержания в сплавах системы Al–Mg–Si содержания кальция с 0,05 до 0,25% сопровождается снижением склонности сплава к образованию горячих трещин при сварке.

Механические свойства соединений, выполненных с наложением импульсов тока, выше, чем без импульсов. Число циклов до разрушения при малоцикловых испытаниях возрастет от 1,5 до 4 раз.

Список литературы:

1. Петров А.В., Славин Г.А. Исследование технологических возможностей импульсной дуги / Сварочное производство. 1962. №2. С. 1–4.
2. Славин Г.А. Формирование дезориентированной структуры металла при наложении низкочастотных возмущений на сварочную ванну / Сварочное производство. 1980. №6. С. 3–5.
3. Славин Г.А., Трохинская Н.М., Рязанцев В.И. Оптимизация параметров режимов ручной и автоматической сварки тонколистовых алюминиевых сплавов с наложением на дугу кратковременных импульсов тока / Сварочное производство. 1986. №1. С. 14–16.
4. Рязанцев В.И., Славин Г.А., Трохинская Н.М. Особенности кристаллизации сварочной ванны при сварке с наложением на дугу кратковременных импульсов тока / Сварочное производство. 1988. №4. С. 39–41.
5. Овчинников В.В., Лопаткин А.И. Применение автоматической аргонодуговой сварки крупногабаритных конструкций из высокопрочных сталей и алюминиевых сплавов на станках с ЧПУ / Сварочное производство. 1994. №10. С. 20–21.

6. Рязанцев В.М., Мацнев В.Н., Овчинников В.В., Гринин В.В. Сборка – сварка авиационных конструкций на станочных комплексах с ЧПУ / Заготовительные производства в машиностроении. 2006. №4. С. 1–16.
7. Зубриенко Г.Л., Галкин Н.П., Гапонов Д.Н. Аргонодуговая сварка алюминиевых сплавов с прерывистой подачей присадочной проволоки / Сварочное производство. 1972. №4. С. 46–47.
8. Ищенко А.Я., Покляцкий А.Г., Лозовская А.В. Влияние параметров низкочастотной модуляции разнополярного тока прямоугольной формы на структуру швов при сварке алюминиевых сплавов / Автоматическая сварка. 1990. №9. С. 23–27.
9. Багелис И.А. Магнитное управление сварочной дугой /Сварочное производство. 1965. №1. С. 17–19.
10. Покляцкий А.Г., Ищенко А.Я., Гринюк А.А. Аргонодуговая сварка алюминиевых сплавов неплавящимся электродом с колебаниями дуги / Автоматическая сварка. 2002. №2. С. 18–22.
11. Власов С.Н., Лапин Т.Е., Лысак В.И. Влияние инертного газа на форму столба дуги и степень сосредоточенности малоамперной дуги неплавящегося электрода / Сварочное производство. 2006. №12. С. 3–6.
12. Барабохин Н.С., Шиганов Н.В., Сошко И.Ф., Иванов В.В. Газодинамическое давление открытой импульсной дуги / Сварочное производство. 1976. №2. С. 4–6.